

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2019.06.016

# 聚合物泥浆在超深地下连续墙 施工中的应用

陈先智<sup>1,2</sup>, 徐代明<sup>1,2</sup>, 徐 赞<sup>1,2</sup>

(1. 中铁开发投资集团有限公司, 昆明 650118; 2. 昆明轨道交通4号线土建项目建设管理有限公司, 昆明 650213)

**摘要:** 随着城市轨道交通工程及地下空间工程的迅速发展, 深大型基坑工程开始不断涌现, 该类基坑主要有开挖深度深, 开挖面积大等特点。地下连续墙作为富水、自稳性差地层基坑的主要支护形式, 其围护嵌入深度也随着深大型基坑的出现而越来越深。依托昆明轨道交通4号线火车北站工程, 阐述护壁泥浆作用机理, 并通过现场试验分析研究聚合物泥浆在地下连续墙施工过程中控制槽壁稳定性的作用。火车北站工程地下连续墙最深达70 m, 厚度为1.5 m, 在国内同等宽度的地下连续墙中深度尚属首例。研究成果表明, 聚丙烯酸钠泥浆在类似地下连续墙施工中具有良好的护壁性能, 这对类似地下连续墙施工过程中槽壁稳定性控制具有重要的参考意义。

**关键词:** 轨道交通; 地下连续墙; 聚合物; 泥浆; 稳定性

中图分类号: U231.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2019)06-0086-06

## Application of Polymer Slurry in Construction of Ultra-deep Underground Diaphragm Wall

CHEN Xianzhi<sup>1,2</sup>, XU Daiming<sup>1,2</sup>, XU Zan<sup>1,2</sup>(1. China Railway Development & Investment Group Co., Ltd., Kunming 650118;  
2. Kunming Rail Transit Line 4 Civil Engineering Construction Management Co., Ltd., Kunming 650213)

**Abstract:** With the rapid development of urban rail transit engineering and underground space engineering, deep and large foundation pits are continuously emerging. These types of foundations are mainly characterized by an increased excavation depth and a large excavation area. The diaphragm wall is the main form of support for foundation pits in water-rich and self-stabilized strata. The embedded depth of its enclosure is getting deeper and deeper with the appearance of deep and large foundation pit. Based on the North Railway Station of Kunming Rail Transit Line 4, this paper describes the mechanism of wall slurry action and discusses the function of a polymer slurry in controlling the stability of the groove wall during the construction of a diaphragm wall using data from field tests. The diaphragm wall of the North Railway Station project has a depth of nearly 70 m, with a thickness of 1.5 m. The results show that sodium polyacrylate mud exhibits a good wall protection performance in the construction of a diaphragm wall similar to that constructed at the railway station. This has important reference significance for the stability control of groove walls in the construction process of diaphragm walls.

**Keywords:** rail transit; diaphragm wall; polymer; mud; stability

地下连续墙技术是20世纪40、50年代发展起来

的一项先进的深基坑施工技术, 具有结构刚度大, 整体性、防渗性和耐久性好, 既可以作为临时围护结构, 又可以作为永久性挡土、挡水和承重结构等特点, 在世界很多国家得到了推广, 广泛应用于水利、建筑、交通及地下工程中。在地下连续墙施工过程中, 挖掘成槽是其关键工艺, 成槽时需要使用泥浆实现护壁、

收稿日期: 2018-09-28 修回日期: 2018-10-15

第一作者: 陈先智, 男, 本科, 高级工程师, 注册一级建造师(市政公用工程、公路工程专业), 主要从事城市轨道交通施工管理工作, 6349875367@qq.com

携渣、冷却和润滑钻具等功能。泥浆应具有物理和化学的稳定性、合适的流动性、良好的泥皮形成能力及适当的密度，才能满足稳定槽壁的要求。

目前，由于普通泥浆在地下连续墙成槽过程中存在显著问题与缺陷，聚合物泥浆开始得到更为广泛的应用与推广。对此，我国学者就聚合物泥浆在地下连续墙施工中的应用开展了许多研究<sup>[1-10]</sup>。在这些研究的基础上，笔者依托昆明轨道交通4号线火车北站工程，阐述了聚合物泥浆的护壁机理及性能特点并结合现场试验对泥浆配合比效果进行验证，并成功应用于火车北站工程，对类似工程施工及聚合物泥浆运用都具有重要的参考意义。

## 1 工程概况

昆明轨道交通4号线火车北站是截至目前昆明建设规模最大的城市轨道交通车站。车站设计长度为345 m，标准段宽度为25.7 m，总建筑面积为42 580 m<sup>2</sup>。车站为地下4层16 m岛式站台车站，与轨道交通5号线上下重叠同站台换乘，与轨道交通2号线同站台换乘。车站采用明挖顺作法施工，围护结构采用1.5 m厚地下连续墙，标准段墙深65 m，扩大端墙深70 m，基坑开挖深度为35~36 m(见图1)。

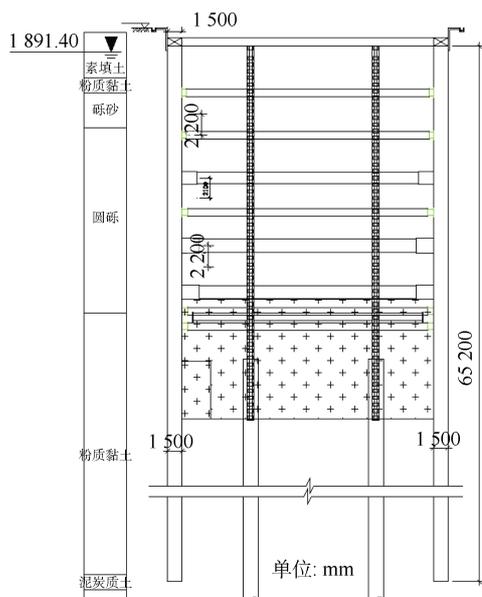


图1 火车北站围护结构及地层  
Fig. 1 The retaining structure and stratum of the North Railway Station

火车北站地处昆明断陷湖积盆地，为盘龙江等地表径流所形成的冲积扇与滇池湖滨相交汇区，地势平坦开阔，海拔高程为1 893.5~1 894.1 m，自然横坡为

1°~2°。

车站周围地层埋深35 m以上以圆砾和黏性土为主，呈带状分布，圆砾层从西向东呈逐渐变薄趋势；埋深35 m以下以可塑黏性土、粉土、砂土为主，夹含泥炭质土和圆砾。地下水为孔隙潜水和孔隙承压水，分布有多个圆砾和砂土含水层，并和盘龙江地表水紧密联系，地下水丰富，存在抗浮和抗渗流稳定性问题。不良地质为砂土液化，液化等级中等。特殊岩土为人工填土、软土，软土地基具有强度低、稳定性差、不均匀沉降及变形大等问题。

## 2 聚合物泥浆护壁机理与性能特点

### 2.1 泥浆护壁作用机理

泥浆护壁原理如图2所示，在泥浆液面压力作用下，其中水分向槽壁土层中渗透，而膨润土颗粒会沉积在槽壁表面，形成泥皮，使得槽壁得到保护。这样，槽内泥浆和土层的水土压力形成平衡，槽壁保持稳定不坍塌。

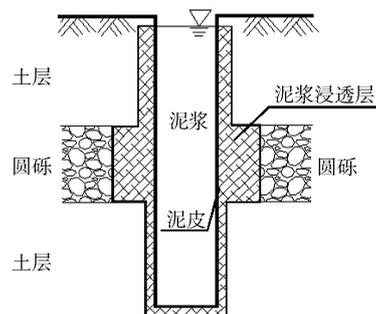


图2 泥浆护壁机理  
Fig. 2 Mechanism of mud wall protection

泥浆的性能指标主要包括黏度、密度、含砂率、pH值、胶体率、静切力、触变性、失水量和泥皮厚稳定性。几个重要的指标对地连墙施工质量的影响如下。

#### 2.1.1 密度

密度过大，说明泥浆中黏粒浓度高，黏度增大，稳定性、造壁性劣化；密度过小，是由于雨水和地下水侵入，稳定性劣化，引起离析，上部泥浆密度减小。

#### 2.1.2 黏度

黏度大，容易携带土粒，土粒不容易沉淀，泥浆不容易侵入土壁，这是有利一面；其不利一面有，泥浆中分离土粒困难，黏度越挖越大，挖掘效率降低。因此强调不同地质不同黏度，即适当黏度。

#### 2.1.3 极限静切力

静切力大，土粒保持不沉淀，土粒也不易分离，

泥浆的流动性变差。浇灌混凝土时，接头处往往防水能力差。

### 2.1.4 良好的泥皮

良好的泥皮是薄而韧，失水量小。厚而脆的泥皮在成槽和下钢筋笼时常会掉落，引起槽壁坍塌，同时泥浆液面会很快下降，尤其是砂性土地层，极易引起槽壁坍塌。

火车北站地下水位较高，在地下1.5~2 m处，地层主要以松散圆砾层为主，在35 m以下主要是粉质黏土及黏土。松散圆砾层自稳性较差，透水性强。这将造成泥浆密度、pH值、黏度等指标的稳定性易受地下水影响，同时泥皮一旦受到破坏，将危及槽壁安全。因此，针对火车北站的特点，为保证槽壁稳定性，必须要有高品质的泥浆来保证成槽安全。

## 2.2 普通泥浆护壁存在的问题

- 1) 泥浆指标不能满足护壁要求，易出现槽壁缩孔或槽壁局部坍塌。
- 2) 浇筑前清孔换浆指标不符合要求，墙体接缝处易出现夹泥、夹砂导致漏水的质量通病。
- 3) 混凝土浇筑时对泥浆性能指标影响较大，废浆率高，不利于环境保护。

## 2.3 聚合物泥浆性能特点

传统泥浆主要成分包括水、膨润土、纯碱、CMC(羧甲基纤维素钠)。其中增加黏度的主要是CMC。

聚丙烯酸钠是一种新型功能高分子材料，其分子式和固态粉末分别如图3、图4所示。聚丙烯酸钠固

态产品为白色(或浅黄色)块状或粉末，加入泥浆后可作增黏剂替代CMC使用。用于泥浆施工的聚丙烯酸钠为食品级，固含量≥96%，分子量>3 000万，黏度为2 000~2 500 mPa·s(0.2%水溶液、25℃、2#转子、6r/min)，pH值为8~9(0.1%水溶液、25℃)。

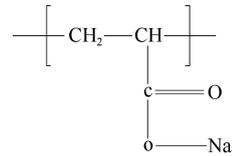


图3 聚丙烯酸钠分子式

Fig. 3 Molecular formula of sodium polyacrylate



图4 聚丙烯酸钠固体粉末

Fig. 4 Sodium polyacrylate (solid powder)

由表1可知，通过与常规泥浆对比，新型材料的应用具有显著的作用与效果，即提高浆液护壁性能、提高浆液循环再利用率；减少环境污染、减少材料消耗；有效地控制成槽风险和质量，施工过程中抽检5幅进行实体检测，合格率为100%；同时极大改善了泥浆施工脏乱差的情况，车间式生产管理展示良好项目形象。

表1 工艺对比

Tab. 1 Comparison of processes

项目	传统 CMC	聚丙烯酸钠	分析
护壁性能	浆液护壁性能<2 d	浆液护壁性能≥3 d	常规材料使用超过2 d则浆液沉淀分层严重失去护壁效果，需不断置换造成大量浪费；新型材料则满足超深超宽地连墙成槽护壁需要，安全、质量可控
材料用量	4 kg/m <sup>3</sup> ×550 m <sup>3</sup> =2 200 kg	1 kg/m <sup>3</sup> ×550 m <sup>3</sup> =550 kg	增黏剂材料的使用降低了4倍
材料价格	2.5 万/t	2.8 万/t	价格上单幅墙施工节省3.96万元
绿色环保	对地下水化学腐蚀危害较大，排放对环境污染也较为严重	食品级，对自然环境无污染	环保优点突出
废浆率	施工废浆率为30%	施工废浆率为2%	废浆率降低28%，提高了浆液循环再利用率

## 3 现场泥浆配合比试验

### 3.1 试验确定配合比

基于以上分析，现场进行泥浆配合比试验。配置3组泥浆来确定最佳配合比的成槽泥浆(见表2、表3)。主要通过对比泥浆5 h和24 h的泥浆指标分析，与新浆要

求作对比来确定拟采用的泥浆。

#### 3.1.1 5 h检测指标分析(膨润土还未充分水化部分呈絮凝状)

黏度分析：第1组配合比黏度明显较大，超过新浆要求的指标，成槽过程中使用容易裹砂严重，不利于泥浆分离净化且不利于成本的控制。第2组配合比

黏度满足规范和现场要求,第3组配合比有待24 h充分水化开后再进行检测。

表2 配合比试验数据

**Tab. 2 Mix proportions test data**

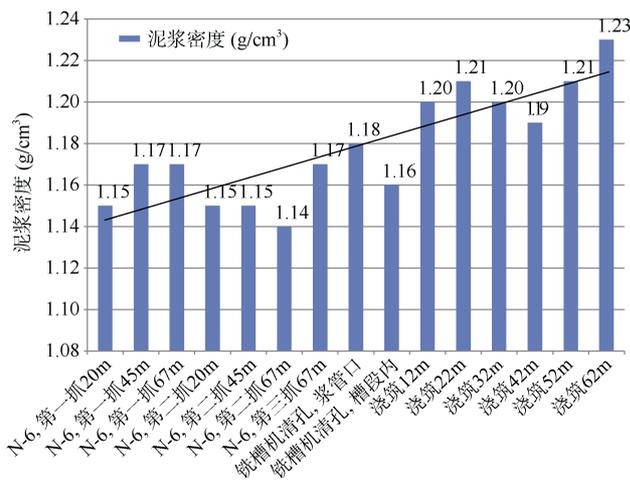
水:膨润土:纯碱: 聚丙烯酸钠/(kg/m <sup>3</sup> )	黏度 (5 h)/s	密度(5 h)/ (g/cm <sup>3</sup> )	黏度 (24 h)/s	密度(24 h)/ (g/cm <sup>3</sup> )
1 000 : 125 : 6 : 4	23.42	1.05	50.80	1.08
1 000 : 100 : 4 : 2	20.15	1.04	26.81	1.06
1 000 : 80 : 4 : 1	18.09	1.05	21.14	1.04

说明:新浆不考虑含砂率和pH值

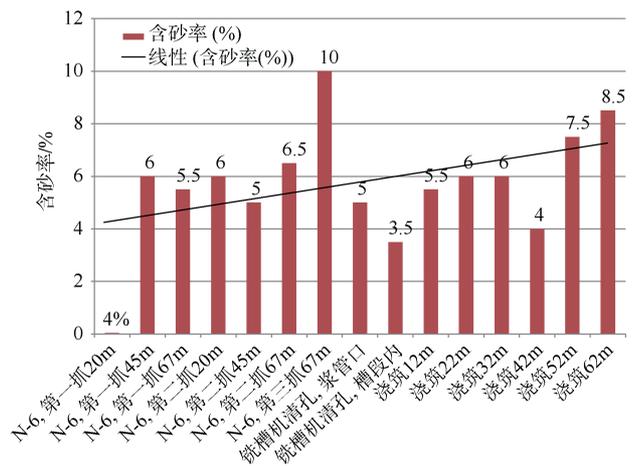
表3 新配置泥浆指标要求

**Tab. 3 New configuration mud indicator requirements**

泥浆性能	新配置泥浆		
	黏性土	砂性土	圆砾
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.04~1.05	1.06~1.08	1.1~1.2
黏度/s	20~24	25~30	>23
含砂率/%	<3	<4	<4
pH值	8~9	8~9	8~9



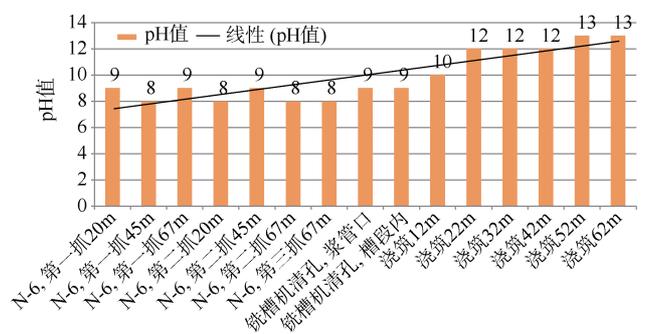
(a) 泥浆密度变化趋势



(b) 泥浆含砂率变化趋势



(c) 泥浆黏度变化趋势



(d) 泥浆pH值变化趋势

图5 泥浆指标变化趋势

Fig. 5 Trend of mud index change

比重分析:3组配合比配制的泥浆均能满足规范和现场要求。

### 3.1.2 24 h 检测指标分析

黏度分析:第1组配合比黏度严重超标,如施工使用会增大废浆率,不利于环保和成本控制。第2组符合循环浆指标,不符合新浆要求。第3组符合新浆的要求,有利于现场成槽施工,且材料用量低,可以降低废浆率,利于施工环保和制浆成本的节约。

比重分析:第2组和第3组配合比均能满足规范和现场要求。

综合上述分析,确定现场制浆使用的配合比为水:膨润土:纯碱:聚丙烯酸钠=1 000:80:4:1。

### 3.2 配合比效果验证

按照试验得出的配合比配置聚合物泥浆,在原位首幅试成槽阶段对泥浆密度、含砂率、黏度、pH值进行过程检测,得出数据,如图5所示。

通过以上数据并结合表4可知,各项指标均能满足该地层对循环泥浆指标的要求,未达到废弃泥浆的指标,泥浆效果较好。

表4 循环泥浆指标要求

Tab. 4 Circulating mud index requirements

泥浆性能	循环泥浆			废弃泥浆		
	黏性土	砂性土	圆砾	黏性土	砂性土	圆砾
比重/(g/cm <sup>3</sup> )	<1.10	<1.15	1.2~1.4	>1.25	>1.35	1.3~1.5
黏度/s	<25	<35	<35	>50	>60	>60
含砂率/%	<4	<7	<10	>8	>11	>11
pH值	>8	>8	>8	>14	>14	>14

### 3.3 泥浆制备及储存

#### 3.3.1 工艺流程

现场聚合物泥浆制备流程如图6所示。

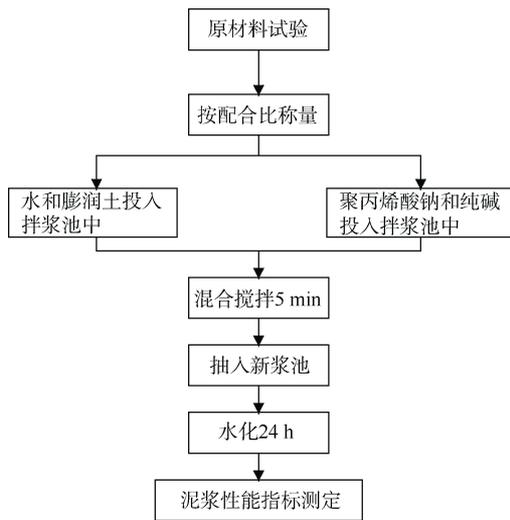


图6 泥浆制备工艺流程

Fig. 6 Mud preparation process

#### 3.3.2 大分量泥浆制备储存

循环浆池的容量设计为1330 m<sup>3</sup>,能够满足2幅地连墙同时施工。泥浆实行分仓管理,另外再设245 m<sup>3</sup>的废浆池和245 m<sup>3</sup>的储浆池(储放新浆)以及2个容积为1.6 m<sup>3</sup>的拌浆池,满足施工需求。图7所示为泥浆制备车间实景。

气流循环防沉淀法,为防止泥浆池内发生沉淀板结情况,泥浆池施工时,在泥浆池底部提前预埋送风管路,开启空压机送风时,可使下层泥浆搅动循环起来,保持浆液的良好性能(见图8)。

#### 3.4 成槽效果检测

在车站围护结构施工过程中,泥浆各项指标均正

常稳定。结合图9可知,在成槽过程中通过超声波测壁手段,对槽壁垂直度及塌孔缩孔等情况进行检测,槽壁稳定性良好,已施工的地下连续墙侧壁均满足规范要求。



图7 泥浆制备车间实景

Fig. 7 Mud preparation workshop



图8 气流循环防沉淀

Fig. 8 Air circulation recirculation

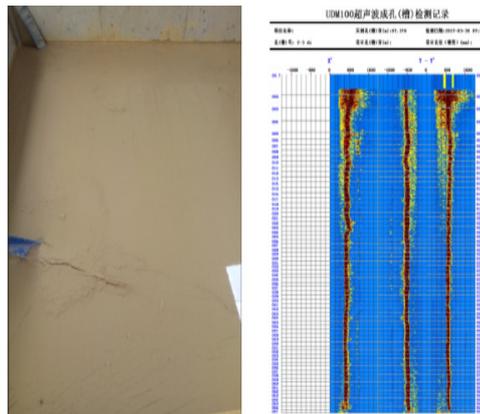


图9 成浆效果及槽壁超深波检测

Fig. 9 Pulping effect and ultra-deep wave detection of groove wall

## 4 结论

笔者依托昆明轨道交通4号线火车北站,阐述了聚丙烯酸钠泥浆在富水圆砾层超深地下连续墙施工中的应用。泥浆性能试验及使用结果表明,聚丙烯酸

钠泥浆在类似地下连续墙施工中具有良好的护壁性能。

1) 从各个环节严格控制新配置泥浆和循环过滤再生泥浆的质量, 可有效提高施工质量。

2) 严格做好清孔换浆工作, 保证混凝土浇筑前的泥浆性能指标符合要求, 避免后期墙体接缝处出现夹泥夹渣影响地连墙质量的问题。

3) 采用聚丙烯酸钠、羧甲基纤维素钠、工业纯碱等外掺剂, 在短期内可有效改善泥浆性能, 有利于应对各种突发情况。

4) 浇筑混凝土至浇筑顶标高 2~3 m 的泥浆直接做废浆处理, 因为这部分泥浆处理难度大, 费用高, 如按循环浆回收则会大范围破坏泥浆性能。

5) 在施工中要通过多试验多总结来不断地改良优化泥浆生产工艺, 减少废浆的产生, 坚持环保绿色施工理念。

#### 参考文献

- [1] 郑玉辉. 聚合物泥浆和聚合物溶液地下连续墙施工护壁机理的探讨[C]//第三届全国岩土与工程学术大会. 成都, 2009.
- [2] 郑玉辉. 地下连续墙施工稳定液的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5914-5918.  
ZHENG Yuhui. An experimental study of polymer solution for underground diaphragm wall[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2005, 24(S2): 5914-5918.
- [3] 郑玉辉. 聚合物溶液在地下连续墙施工中的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(5): 9-10.  
ZHENG Yuhui. Pilot study on polymer solution in diaphragm[J]. Exploration engineering (rock&soil drilling and tunneling), 2004, 31(5): 9-10.
- [4] 唱伟. 地下连续墙施工中低固相不分散聚合物稳定液的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(4): 13-14.
- [5] 郑玉辉. 聚合物泥浆在地下连续墙施工中试验[J]. 水文地质工程地质, 2003(6): 69-71.  
ZHENG Yuhui. Application of polymer mud in construction continuous concrete wall[J]. Hydrogeology & engineering geology, 2003(6): 69-71.
- [6] 谢彬. 一种新型的地下连续墙护壁泥浆[J]. 华南港工, 2001(3): 32-36.
- [7] 孙立宝. 超深地下连续墙施工中若干问题探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(2): 51-55.  
SUN Libao. Discussion on the construction of super deep underground diaphragm wall[J]. Exploration engineering (rock & soil drilling and tunneling), 2010, 37(2): 51-55.
- [8] 丁勇春, 李光辉, 程泽坤, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2704-2709.  
DING Yongchun, LI Guanghui, CHENG Zekun, et al. Analysis of trench face stability of diaphragm wall during slurry trenching[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(S1): 2704-2709.
- [9] 张厚美, 夏明耀. 地下连续墙泥浆槽壁稳定的三维分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 73-76.  
ZHANG Houmei, XIA Mingyao. 3-D stability analysis of slurry trenches[J]. China civil engineering journal, 2000, 33(1): 73-76.
- [10] 范巍, 王建华, 陈锦剑. 连续墙与土体接触特性对深基坑变形分析的影响[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2118-2121.  
FAN Wei, WANG Jianhua, CHEN Jinjian. The evaluation of deformation induced by excavation considering the properties of diaphragm soil interface[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(12): 2118-2121.

(编辑: 郝京红)

### 世界上海拔最高的有轨电车示范线全线通过验收

青海省德令哈市新能源现代有轨电车项目规划建设 T1 线、T1 支线和 T2 线 3 条有轨电车线路, 总长 14.36 km。线路均为地面线, 沿线设立车站 19 座、车辆基地 1 座, 连通汽车站、火车站等交通枢纽, 同时将海西州民族文化活动中心、海子纪念馆、巴音河景区等城市观光资源进行有效串联, 助推当地旅游产业发展。项目建成后将是中国西部地区第一条现代有轨电车线路, 也是目前世界上海拔最高的有轨电车线路, 标志着现代有轨电车首次走进高原、走进中国西部, 它不仅填补了中国西部地区现代有轨电车“零”的空白, 同时也树立起世界海拔最高有轨电车新的丰碑。整个工程验收计划在 2019 年底全部完成, 预计 2020 年投入运营。

北京城建设计发展集团股份有限公司德令哈新能源现代有轨电车项目负责人介绍, 德令哈有轨电车项目采用 EPC 模式建设, 车辆制式为两模块列车, 以蓄电池加超级电容方式供电, 起始站及线路沿线均配备充电装置, 一次可载客 168 人。

摘编自 <http://www.camet.org.cn/2019-10-15>